

Опыт применения



От партнеров программы Natural Gas STAR

REDUCING EMISSIONS WHEN TAKING COMPRESSORS OFF-LINE

СОКРАЩЕНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ КОМПРЕССОРОВ

Аннотация

Компрессоры широко используются в газовых сетях от промышленных газосборных сетей и сооружений подготовки газа к дальнейшему транспортированию до систем газораспределения. При отключении компрессоров могут возникать утечки метана в различных местах в зависимости от герметичности системы. В отключенных от газопровода системах утечки метана происходят в результате "продувки" - выброса в атмосферу сжатого газа, оставшегося в компрессорах, и от продолжительных утечек из запорных клапанов. В системе под давлением метан может просачиваться через закрытый продувочный клапан и уплотнения штоков компрессора.

Партнеры Natural Gas STAR обнаружили, что простые изменения в методах работы обеспечивают экономию денежных средств и значительно снижают утечки метана. За счет поддержания герметичности компрессоров, отключенных по производственным причинам, достигается быстрая окупаемость, т. к. для этого не требуются дополнительные капитальные затраты, и снижаются утечки метана после сбросов давления. Рассматриваемые далее два метода способствуют снижению эмиссии метана. Подсоединение линий продувки к системе подачи топливного газа при отключенном компрессоре позволяет использовать газ, обычно выбрасываемый в атмосферу. Для устранения утечек через уплотнение штока при отключении компрессора можно установить неподвижные сальники на штоки компрессора. Основными преимуществами этих методов являются значительное снижение объемов выбросов газа, интенсивности утечек, более низкие затраты на топливо при сроке окупаемости менее года.

Действие (снижение утечек из компрессора)	Экономия газа, тыс. фут. ³ (тыс. м ³)/год	Чистый доход от экономии газа, \$/год ²	Затраты на внедрение, \$	Окупаемость ³
Вариант 1: Поддержка герметичности	4 400 (125)	13 200	0	Немедленная
Вариант 2: Поддержка герметичности и использование газа в качестве топлива	+1 345 ¹ (+38)	+4 035 ¹	1 250	4 месяца
Вариант 3: Поддержка герметичности и установка неподвижного уплотнения	+1 200 ¹ (34)	+3 600 ¹	3 000	10 месяцев

¹ Превышение базового уровня
² Стоимость газа = \$3/тыс. фут.³ (\$106/тыс. м³)
³ Ставка дисконта 10%

Настоящий документ - один из отчетов серии "Опыт применения", разработанной EPA в сотрудничестве с газовой отраслью в рамках проектов программы Natural Gas STAR.

Компрессоры, используемые в газовых сетях, периодически включаются и выключаются в зависимости от изменений текущего потребления природного газа. Остановки компрессора обусловлены также необходимостью технического обслуживания и возникающими аварийными ситуациями. В общепринятой практике при отключении компрессора производится "продувка", при которой из компрессора выбрасывается оставшийся в нем под высоким давлением газ. После сброса давления утечки метана продолжают через запорные клапаны установки. Когда компрессор находится под давлением, метан может просачиваться через закрытый продувочный клапан и уплотнения штоков компрессора (рис. 1).

Рис. 1: Схема компрессора



Количество продувок компрессора в производственных целях зависит от эксплуатационных режимов. Компрессоры, работающие в режиме базовых нагрузок, то есть находящиеся в рабочем режиме основную часть времени, обычно подвергаются продувке три раза в год. Время простоя для этих компрессоров составляет в среднем 500 часов в год. Другие компрессоры работают при максимальной нагрузке и подключаются к системе только при возрастании спроса и необходимости поддержания высокого давления в трубопроводе, а при падении спроса на рынке отключаются от сети. Количество и время отключений этих компрессоров составляет в среднем 40 раз и 4 000 часов в год.

Соотношение между базовыми и максимальными нагрузками компрессоров в различных газотранспортных компаниях значительно варьируется ввиду отличий в эксплуатационных стратегиях, конструкциях применяемых систем и потребностей рынков. На некоторых трубопроводах 40 процентов компрессоров могут эксплуатироваться при базовых нагрузках, на других - 75 процентов эксплуатируются в режиме обычной нагрузки.

Наибольший источник утечек метана связан с переходом компрессоров в режим отключения от системы при осуществлении цикла продувки или выпуска оставшегося в компрессоре газа (т. е. при сбросе давления). В среднем, одна продувка приводит к выбросу около 15 тыс. фут.³ (424,7 м³) газа в атмосферу.

Запорный клапан установки является еще одним источником утечек метана из компрессоров при отключении. Эти крупногабаритные клапаны отключают компрессор от сети и могут пропускать существенное количество метана из трубопровода высокого давления в атмосферу из-за разницы давления в системах. Обычный объем утечек для таких клапанов составляет 1 400 фут.³ (39,6 м³) в час. Несмотря на то, что клапаны периодически проходят техническое обслуживание для предотвращения утечек, их труднодоступность является причиной нарастания интенсивности утечек в период между плановым техническим обслуживанием и ремонтными работами.

Другим источником утечек из компрессоров при их отключении являются уплотнения штоков компрессора и клапаны продувки. Уплотнения на поршневых штоках компрессора пропускают газ в обычном рабочем цикле, но утечки увеличиваются приблизительно в четыре раза (примерно на 75 фут.³ (2,1 м³) в час на шток, или на 300 фут.³ (8,5 м³) в час на четырехцилиндровый компрессор) при простаивании компрессора или нарастании в нем избыточного давления, то есть без продувки. Утечки происходят через зазоры между уплотнительными кольцами и их опорными пазами, которые закрываются при перемещении поршневого штока и смазки (см. отчет «Сокращение эмиссии метана через систему уплотнения штока компрессора» серии «Опыт применения»). Продувочные клапаны также пропускают метан через системы герметизации со средней интенсивностью 150 фут.³/час. (4,2 м³/час).

Партнеры Natural Gas STAR значительно снизили утечки метана из компрессоров, отключенных от системы по производственным причинам, применив один или более из трех предложенных ниже методов:

1. Поддержка герметичности компрессора. Для устранения утечек при продувке компрессора поддерживайте полную герметизацию компрессора. Это существенно снижает интенсивность утечек через клапаны приблизительно от 1 400 фут.³/час. (39,6 м³/час.) до 450 фут.³/час. (12,7 м³/час.) из продувочного клапана и уплотнителей штока. Данный метод не требует доработки оборудования и считается наилучшим для компрессоров всех типов, где возможно его применение.

2. Поддержка герметичности и маршрутизация газа для использования в качестве топлива. Подсоединение вытяжных линий продувки к системе подачи топливного газа позволяет использовать обычно выбрасываемый газ в качестве топлива при отключении компрессора. Как только давление между топливной системой и компрессором уравновешено, компрессор работает при небольшой нагрузке при давлении топливного газа (обычно 100 - 150 фунтов на квадратный дюйм (689,5 - 1 034,2 кПа)). Утечка через уплотнения компрессора и систему продувки снижается приблизительно до 125 фут.³/час. (3,5 м³/час.). Утечки через клапаны системы поступают в компрессор и затем в топливную систему через вытяжную линию.

3. Поддержка герметичности и установка неподвижного сальника. Наличие неподвижного сальника на штоках компрессора исключает утечки через уплотнители штока во время остановки, когда компрессор находится в герметичном состоянии. Неподвижный сальник устанавливается на каждый вал штока с наружной стороны стандартного уплотнения. Автоматический контроллер включается при остановке компрессора и подает команду на сжатие герметичного уплотнения вокруг вала; при запуске контроллер ослабляет уплотнение.

Принятие решения

Утечки возникают только из продувочного клапана с интенсивностью приблизительно 150 фут.³/час (4,2 м³/час), когда система находится под давлением.

Экономические и экологические выгоды

Партнеры Natural Gas STAR могут достичь существенных экологических и экономических преимуществ, используя простые действия по устранению продувок и исключению разгерметизации компрессоров, когда это возможно:

- ★ **Снижение значительных объемов выбросов газа:** поддерживая герметичность компрессоров, находящихся в отключенном состоянии, операторы экономят 15 тыс. фут.³ (424,7 м³) газа каждый раз при отключении компрессора. Предполагая, что установки с базовой нагрузкой подвергаются продувке три раза в год, а установки, работающие в режимах пиковых нагрузок - 40, можно рассчитать, что ежегодная экономия составит 45-660 тыс. фут.³ (1,3-18,7 тыс. м³).
- ★ **Снижение объемов утечек:** поддержание полной герметичности компрессоров позволит избежать существенных утечек через клапаны в объеме 475 тыс. фут.³ (13,5 тыс. м³) в год при обычной нагрузке на оборудование и до 3 800 тыс. фут.³ (107,6 тыс. м³) в год при максимальной нагрузке на оборудование.
- ★ **Снижение затрат на топливо:** подача газа из компрессора в топливную систему позволяет использовать этот газ, который иначе был бы выпущен в атмосферу, и, тем самым, снизить затраты на приобретение топлива.

Операторы могут легко и рентабельно снизить утечки метана из компрессоров, находящихся в отключенном состоянии, с учетом следующего:

Этап 1: Определите альтернативные варианты методам продувки. Три варианта, описание в разделе “Описание технологии”, можно использовать, когда компрессор находится в отключенном состоянии по производственным причинам:

- ★ **Вариант 1. Поддержание герметичности компрессора.**
- ★ **Вариант 2. Поддержание герметичности компрессора и использование газа в качестве топлива.**
- ★ **Вариант 3. Поддержание герметичности компрессора и установка неподвижного уплотнения.**

Наилучшим вариантом для любых компрессоров считается поддержание герметичности, когда это возможно. Варианты 2 и 3 обеспечивают дополнительную экономию газа при совместном использовании с Вариантом 1. Вариант 2 может применяться в случае, когда компрессор находится в отключенном состоянии для технического обслуживания или в результате аварии; отвод газа из компрессора к топливной системе до начала продувки компрессора позволяет снизить утечки и повысить рентабельность.

Этап 2: Рассчитайте количество и стоимость утечек метана.

Суммарные утечки метана из отключенного компрессора при применении продувки представляют собой сумму потерь от собственно продувки и через клапаны системы в течение времени его разгерметизации. Исходными данными для расчета суммарных потерь на компрессор в год включают:

- ★ Количество продувок в год (B).
- ★ Внутренний (V) герметичный объем компрессора, заключенный между изолирующими клапанами. Объем газа, выбрасываемого при продувке, зависит от внутреннего объема компрессора, общей протяженности труб между изолирующими клапанами и давления. Количество этого газа может быть вычислено на основе закона Генри (объем обратно пропорционален давлению или $P_1V_1 = P_2V_2$). (EPA допускает погрешность 15 тыс. фут.³ (424,7 м³) на продувку).
- ★ Продолжительность периода остановки (T).
- ★ Интенсивность утечек через клапаны (U). Утечки через клапаны можно измерить на выходе из клапана переносными измерительными приборами. Интенсивность утечек, как правило, увеличивается после последнего технического обслуживания клапанов. Для данного расчета принимается погрешность 1 400 фут.³ (39,6 м³) в час.

Суммарные утечки (TE) рассчитываются на основе выражения $TE = BV + TU$. Общая стоимость (TV) утечек (TE) с учетом цены (P) газа определяется как $TV = TE \times P$.

Большая часть этой информации может быть получена из рабочих отчетов, технической документации или рассчитана. На рис. 2 представлены два примера расчета утечек, первый - для компрессора, работающего в обычном режиме, и второй - для компрессора, работающего с максимальной нагрузкой.

Рис. 2: Примеры расчета		
Допущения	Обычная нагрузка	Максимальная нагрузка
Количество продувок в год	3	40
Объем сжатого газа, фут. ³ (м ³)	15 000 (425)	15 000 (425)
Время простоя в год, час.	500	4 000
Объем утечек из клапана, фут. ³ (м ³)/час	1 400 (40)	1 400 (40)
Пример 1: Компрессор с обычной нагрузкой		
Суммарные утечки	= (3 x 15 тыс. фут. ³) + (500 час. x 1,4 тыс. фут. ³ /час.)	
Общая стоимость	= 745 тыс. фут. ³ /год (21,1 тыс. м ³ /год) = 745 тыс. фут. ³ /год x \$3,00/тыс. фут. ³ = \$2 235 в год	
Пример 2: Компрессор с максимальной нагрузкой		
Суммарные утечки	= (40 x 15 тыс. фут. ³) + (4 000 час. x 1,4 тыс. фут. ³ /час.)	
Общая стоимость	= 6 200 тыс. фут. ³ /год (175,6 тыс. м ³ /год) = 6 200 тыс. фут. ³ /год x \$3,00/тыс. фут. ³ = \$18 600 в год	

Этап 3: Вычислить затраты для каждого варианта. Стоимость каждого варианта рассчитывается с учетом капитальных затрат, дополнительных эксплуатационных затрат, затрат на техническое обслуживание и объем утечек при отключении компрессора. Итоговые суммы затрат для каждого варианта приведены ниже.

- ★ **Вариант 1. Поддержание герметичности компрессора.** Этот вариант не имеет капитальных затрат, затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание. После обеспечения герметизации утечки возможны через уплотнение штока компрессора и составляют 300 фут.³/час. (8,5 м³/час.) на компрессор, а также через продувочный клапан - 150 фут.³/час. (4,2 м³/час.), что в сумме составляет приблизительно 450 фут.³/час. (12,7 м³/час.) при полной герметизации компрессора.
- ★ **Вариант 2. Поддержание герметичности компрессора и использование газа в качестве топлива.** Этот вариант предполагает монтаж дополнительной системы труб и клапанов для направления газа из отключенного компрессора в систему подачи топливного газа в компрессорную станцию. Затраты на модернизацию оборудования составляют от \$900 до \$1 600 на компрессор. Основными влияющими факторами на стоимость модернизации являются габариты компрессора, количество фитингов, клапанов, размер и протяженность трубопровода, наличие автоматического анализатора. После выравнивания давления в компрессоре и в топливной магистрали утечки через уплотнения штоков компрессора снижаются приблизительно до 50 фут.³/час. (1,4 м³/час.), а через продувочный клапан - приблизительно до 75 фут.³/час. (2,1 м³/час.), что составляет около 125 фут.³/час. (3,5 м³/час.).
- ★ **Вариант 3. Поддержание герметичности компрессора и установка неподвижного уплотнения на штоки компрессора.** Этот вариант технически совместим с любым вариантом, но он экономически не эффективен при совместном применении с Вариантом 2 (т. к. интенсивность утечек значительно ниже для компрессора, который находится в свободном режиме под низким давлением топливной системы). Затраты на этот вариант включают стоимость неподвижного уплотнения, приблизительно \$500 на один шток, и стоимость автоматического контроллера, около \$1 000 на весь компрессор, что в сумме составляет \$ 3 000 для четырехштокового компрессора. После устранения утечек через уплотнение штока возможны утечки приблизительно 150 фут.³/час. (4,2 м³/час) газа через продувочные клапаны.

На рис. 3 представлены затраты, связанные с этими вариантами. Утечки при отключенном компрессоре рассчитываются как сумма утечек через уплотнения штоков компрессора и продувочный клапан с учетом продолжительности отключения (рис. 2).

Этап 4: Оценка экономической эффективности. После определения объемов и стоимости утечек метана, а также затрат по каждому из вариантов проводят экономический анализ. Простым способом оценки экономической эффективности является расчет дисконтированного поступления прибыли, в результате которого капитальные затраты на внедрение каждого из вариантов сопоставляются с дисконтированной прибылью, получаемой в результате устранения утечек.

Рис. 3: Капитальные затраты и интенсивность утечек для различных вариантов			
	Вариант 1 Поддержание герметичности	Вариант 2 Поддержание герметичности компрессора и использование газа в качестве топлива	Вариант 3 Поддержание герметичности компрессора и установка неподвижного уплотнения на штоки компрессора
Капитальные затраты	Нет	\$1 250/компрессор	\$3 000/компрессор
Утечки при отключении компрессора			
Обычная нагрузка	225 (6,4) тыс. фут. ³ (тыс. м ³)/год \$675	63 (1,8) тыс. фут. ³ (тыс. м ³)/год \$189	75 (2,1) тыс. фут. ³ (тыс. м ³)/год \$225
Максимальная нагрузка	1 800 (51) тыс. фут. ³ (тыс. м ³)/год \$5 400	500 (14,1) тыс. фут. ³ (тыс. м ³)/год \$1 500	600 (17) тыс. фут. ³ (тыс. м ³)/год \$1 800
Примечание: при обычной нагрузке предполагается, что компрессор находится в отключенном состоянии 500 часов в год; при максимальной нагрузке - 4 000 часов в год. Стоимость газа = \$3/тыс. фут. ³ (\$106/тыс. м ³).			

Для Варианта 1 экономия представляет собой разницу объемов утечек метана, представленных на рис. 2, и утечек, регистрируемых при отключенном компрессоре при его полной герметизации (рис. 3). Экономия для Вариантов 2 и 3 рассчитывается при дальнейшем снижении результирующих утечек газа по Варианту 1 за счет модернизации системы.

На рис. 4 приведена оценка экономии по Варианту 1 и ее рост в результате дополнительного применения Вариантов 2 и 3. Вариант 1 быстро окупается без дополнительных инвестиций. Для Варианта 3 при базовой нагрузке не обеспечивается возврат средств, вложенных в оборудование, в течение пяти лет. Установка уплотнений поршневых штоков дополнительно с подключением к газотопливной системе (Вариант 2) не является экономически привлекательной в режимах обычной и пиковой нагрузок.

Рис. 4: Сравнение экономической эффективности вариантов

	Вариант 1 Поддержание герметичности		Вариант 2 Поддержание герметичности и подсоединение к газотопливной системе		Вариант 3 Поддержание герметичности и установка неподвижного уплотнения	
	Обычная нагрузка	Максимальная нагрузка	Обычная нагрузка	Максимальная нагрузка	Обычная нагрузка	Максимальная нагрузка
Результирующая экономия газа, тыс. фут. ³ (тыс. м ³)/год	520 (15)	4 400 (125)	+207 (+6)	+1 345 (+38)	+150 (+4)	+1 200 (+34)
Экономия денежных средств, \$/год ¹	\$1 560	\$13 200	\$621	\$4 035	\$450	\$3 600
Капиталовложения в оборудование	0	0	\$1 250	\$1 250	\$3 000	\$3 000
Окупаемость ²	Немедленная	Немедленная	3 года	4 месяца	Нет	10 месяцев
Внутренняя норма рентабельности ³	>100%	>100%	41%	323%	Отрицательная	118%

¹ - Принятая стоимость газа \$3/тыс. фут.³ (\$106/ тыс. м³).
² - Работа в течение 5 лет и ставка дисконтирования 10%.
³ - Работа в течение 5 лет (не включая годовые затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание)

Рекомендации по установке

Ниже приведены рекомендации, которые используют партнеры Natural Gas STAR, для оценки вариантов и снижения утечек при отключенном компрессоре:

- ★ Как правило, каждые 12 - 18 месяцев компании проводят межремонтное техническое обслуживание установки, ремонт запорных клапанов и переоборудование, например, подсоединение к газо-топливной системе. Максимальные утечки через клапаны установки, продувочные клапаны и уплотнения штоков компрессора наблюдаются в конце рабочего цикла в межремонтный период.
- ★ Проблемы с безопасной эксплуатацией могут возникнуть при попытке поддержания давления газа в остановленном компрессоре из-за увеличения утечек через уплотнения штока компрессора. Установка неподвижного уплотнения на штоки компрессора устраняет эти утечки.
- ★ Разгерметизация компрессоров, находящихся в отключенном состоянии для подключения к газо-топливной системе эффективна только при достаточном спросе на газовое топливо в объеме, который дают утечки через запорный клапан (расчетная величина 1,4 тыс. фут.³/час. (39,6 м³/час.)).
- ★ Поддержание герметичности изоляционных клапанов. Герметизация уплотнения изоляционных клапанов устраняет 90 процентов ежегодных утечек от объема эмиссии, характерного для периода остановки компрессора и применения метода продувки. Однако ремонт обходится дорого из-за высокой стоимости клапанов и трудозатрат, объема утечки в период отключения компрессора и разгерметизации всей установки для получения доступа к этим клапанам.

Рассмотрение конкретного случая

При возрастающем интересе к экономии и снижению утечек газа компания А исследовала несколько способов снижения утечек через уплотнения штока компрессора. Во время отключения компрессора от системы компания подсоединяла компрессор к газо-топливной системе. При более низком давлении в цилиндре компрессора утечки через корпус уплотнения штока и продувочные клапаны были значительно уменьшены. Для 3 022 цилиндров компрессоров (общее количество компрессорных установок 577), работающих 40 процентов времени, общая экономия газа составляет 1,58 млрд. фут.³ в год (44,7 млн. м³ в год).

Опыт применения

Партнеры могут сделать вывод, что существенное снижение затрат и объемов утечек достигается в результате отказа от использования обычной практики продувки компрессора там, где это допустимо, а также путем устранения или перенаправления утечек. Экономия достигается за счет сохранения продукта или замены топлива газом. Основные моменты приобретенного опыта партнеров программы Natural Gas STAR включают:

- ★ Исключение разгерметизации, когда это возможно. Наибольшую непосредственную экономию можно получить без дополнительных затрат, поддерживая герметизацию компрессоров, которые находятся в отключенном состоянии.
- ★ Информирование обслуживающего персонала о недостатках применения продувок.
- ★ Составление графика остановки компрессоров для определения режимов работы при обычной и максимальной нагрузках. Используйте эту информацию для проведения экономического анализа Вариантов 2 и 3.
- ★ Разработка графика модернизации компрессоров по подключению к газо-топливной системе, установке неподвижного сальника на шток компрессора, когда это экономически оправдано.
- ★ Регистрация сокращений по каждому компрессору.
- ★ Сокращение утечек метана должно быть включено в раздел годового отчета по программе Natural Gas STAR.

Литература

Borders, Robert S.C. Lee Cook, personal contact.

Campbell, Alastair J. Bently Nevada Corporation, Houston, Texas. *Optical Alignment of Reciprocating Compressors*.

"Compressor Shutdown Leakage." *Pipeline & Gas Journal*, December 1985.

France Compressor Products. *Mechanical Packing - Design and Theory of Operation*, Bulletin 691.

Maholic, James. France Compressor Products, personal contact.

Minotti, Marcello. ENRON, personal contact.



United States
Environmental Protection Agency
Air and Radiation (6202J)
1200 Pennsylvania Ave., NW
Washington, DC 20460

EPA430-B-04-001
Февраль 2004 г.